

红壤丘陵区玉米鲜食大豆间作的丰产增效和土壤培肥效应^①

宋惠洁¹, 秦文婧², 李桂龙², 刘佳², 胡丹丹¹, 吴艳¹, 柳开楼^{1*}

(1 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 331717; 2 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 农业农村部酸化土改良与利用重点实验室, 南昌 330200)

摘要: 为探究红壤丘陵区玉米和鲜食大豆的合理间作模式, 于2022年以玉米(郑单958)和鲜食大豆(浙鲜16)为试验材料, 采用裂区试验, 主区设置玉米鲜食大豆间作种植模式, 包括玉米单作(M)、鲜食大豆单作(S)、2行玉米2行鲜食大豆间作(2M2S)和4行玉米2行鲜食大豆间作(4M2S), 每个主区设置3个裂区, 分别为大豆在玉米播种前15 d播种(D1, 4月12日)、大豆与玉米同期播种(D2, 4月27日)、大豆在玉米播种后15 d播种(D3, 5月12日), 研究各处理玉米产量、鲜食大豆产量、鲜食大豆蛋白质含量、土地当量比和土壤肥力等指标的变化。结果表明: 与S模式相比, 2M2S模式有利于提升单位面积鲜食大豆的荚果鲜重, 增幅为20.8%, 且播种越早, 荚果鲜重越高。2M2S和4M2S模式均有利于提高土地当量比和经济效益, 其中土地当量比分别比S模式提高了66%和40%, 经济效益分别比S模式提高了1.32倍和61.7%, 经济效益也分别比M模式提高了94.7%和35.2%, 且2M2S模式的土地当量比和经济效益显著高于4M2S模式; 同时, 播期越早, 土地当量比和经济效益越高。与S模式相比, 2M2S模式的鲜食大豆蛋白质含量显著提升, 但3个播期之间的蛋白质含量无显著差异。不同间作模式和播期主要显著影响土壤碱解氮和速效钾含量, 与M模式相比, 2M2S和4M2S模式的土壤碱解氮含量分别提高了37.6%和22.6%, 土壤速效钾的增幅分别为22.0%和5.4%, 且播期越早, 土壤碱解氮含量越高。因此, 在红壤丘陵区, 2M2S模式更有利于提高土地当量比和经济效益, 并显著提升土壤碱解氮和速效钾含量, 且在4月12日至5月12日之间, 鲜食大豆播种越早越有利于。

关键词: 间作; 产量; 土地当量比; 经济效益; 土壤养分

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Effects of Corn-Edamame Intercropping Modes on Yield, Efficiency and Soil Fertility in Red Soil Hilly Areas

SONG Huijie¹, QIN Wenjing², LI Guilong², LIU Jia², HU Dandan¹, WU Yan¹, LIU Kailou^{1*}

(1 Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 2 Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Acidified Soil Improvement and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Nanchang 330200, China)

Abstract: In order to explore the reasonable corn-edamame intercropping modes in red soil hilly areas, the corn (Zhengdan 958) and edamame (Zhexian 16) were used as experimental materials in 2022, then, four main treatments were set up, including corn monoculture (M), edamame monoculture (S), 2 rows of corn and 2 rows of edamame intercropping (2M2S) and 4 rows of corn and 2 rows of edamame intercropping (4M2S). Each main treatment was set up with 3 split treatments, including sowing edamame in 15 days before corn sowing (D1, 12 April, 2022), simultaneously sowing edamame and corn (D2, 27 April, 2022), and sowing edamame in 15 days after corn sowing (D3, 12 May, 2022). The changes in corn yield, edamame yield, edamame protein content, land equivalent ratio, and soil nutrient contents under different treatments were analyzed. The results showed that: compared with S mode, the fresh weight of pods per unit area of edamame under 2M2S was significantly increased by 20.8%. The earlier the sowing, the higher the fresh weight of pods. Both 2M2S and 4M2S were beneficial for improving the land equivalent ratio and economic benefits, their land equivalent ratios were 66% and 40% higher than S, respectively; Their economic benefits

^①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901201-05), 江西省农业科技攻关项目(JXNK202307-01)和江西省豆类产业技术体系项目(JXARS-24-02)资助。

* 通讯作者(liukailou@163.com)

作者简介: 宋惠洁(1990—), 女, 河南漯河人, 硕士, 农艺师, 主要从事红壤改良与培肥研究。E-mail: yu0395songhuije@163.com

were increased by 1.32 times and 61.7%, compared to S. Moreover, the land equivalent ratio and economic benefit under 2M2S were significantly higher than those of 4M2S. The earlier the sowing date, the higher the land equivalent ratio and economic benefit. Compared with S, the protein content of 2M2S edamame was significantly increased, while there was no significant change in protein content among the three sowing periods. Different row ratios and sowing dates mainly significantly affected the contents of soil alkaline nitrogen and available potassium. Compared with M, soil alkaline nitrogen contents under 2M2S and 4M2S were increased by 37.6% and 22.6%, and their soil available potassium contents were increased by 22.0% and 5.4%, respectively. Among the three sowing periods, the earlier the sowing period, the higher soil alkaline nitrogen content. Therefore, in the hilly area of red soil, two rows of corn and two rows of edamame (2M2S) is beneficial for improving soil equivalence ratio, economic benefit, and significantly increasing soil alkaline nitrogen and available potassium contents, and between 12th April and 12th May, the earlier the edamame is sown, the more benefit and soil fertility.

Key words: Intercropping; Yield; Land equivalent ratio; Economic benefit; Soil nutrient

为在有限的耕地上生产出更多的粮食,解决我国一直以来面临的人均耕地少、粮食缺口大的问题,学者们做了大量的努力,不断通过栽培^[1-2]、育种^[3]、土壤培肥改良^[4]等措施提高粮食产量和改善耕地质量。间套作种植一方面可以充分利用土地资源,缓解作物争地的问题^[5],另一方面也可以利用作物的协同作用有效增加粮食总产^[6-7]。玉米大豆带状复合种植技术因其在保障玉米播种面积的同时会增加大豆播种面积,助力我国大豆产业的发展,在我国西南地区被广泛采用^[7-8]。

国家农业主管部门发布的《2022年西南地区大豆玉米带状复合种植技术意见》^[9]中,合理的玉米大豆带状套、间作株行比例为2:3或2:4,玉米带宽40 cm,套作大豆带宽60~70 cm,间作大豆带宽90~120 cm,玉米带与大豆带间距70 cm;带状间作或套作要确保玉米株距12~14 cm、大豆株距9~11 cm;同时,设置的大豆和玉米播种期也存在显著不同,带状套作为:玉米于3月下旬至4月上旬播种、大豆于6月上中旬播种,带状间作为:云南、贵州等带状间作春玉米、春大豆于4月上中旬播种,四川、重庆等带状间作夏玉米、春大豆于5月中下旬播种。为充分了解该模式,发挥其最大的效益,我国专家和学者也开展了大量的研究工作。研究发现,在西南地区,2行玉米2行大豆模式对绿叶数量、叶片氮含量提升效果显著,且土地当量比也较高^[10-11]。在共生期内,与相应单作相比,2行玉米2行大豆处理提高了土壤硝化作用、氨化作用强度,但土壤固氮作用无显著变化,提高了表层土中硝态氮残留量,降低了氨挥发率及N₂O损失率^[12]。进一步研究发现,较高的碳氮代谢活性和光合产物运输能力是增强套作大豆抗倒伏能力的物质基础和代谢基础^[13]。同时,选择紧凑或半紧凑型玉米品种,适度缩小玉米窄行距可以显著改善

带状套作大豆的生长环境,提高其生物量和产量^[14]。窄行距试验表明,在玉米窄行距20、40、60、80、100 cm,宽行距180、170、160、150、140、120、100 cm,玉豆间距70、65、60、55、50、40 cm等处理中,各窄行距于40 cm处玉米大豆系统竞争达到平衡,可协调带状套作下玉米和大豆竞争互补以及物质分配^[15]。此外,在东北地区玉米与大豆复合种植的最佳比例也大多为2行玉米2行大豆^[16],但在西北地区4行玉米2行大豆模式的产量和水分利用率则较高^[17]。

但以往的研究大多集中在对地上部作物指标的测定和分析,且大豆主要为籽粒大豆。近年来,鲜食大豆因其优良的品质和独特的风味颇受欢迎,在市场上逐渐占据重要地位,为当地农民增收和农业增产做出了重要贡献,在我国南方有较大的种植面积。且有研究表明,玉米鲜食大豆间作模式有利于改善水分供需平衡,提高土地单位面积总产量^[18]。但玉米鲜食大豆间作方式在各地区的丰产增效和土壤培肥效应尚缺乏系统的研究,尤其是在红壤丘陵区。因此,本研究选择在红壤丘陵区开展了玉米鲜食大豆间作种植模式试验,以为该区农业增产、农民增收以及土壤培肥提供理论基础和实践经验。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022年在江西省红壤及种质资源研究所进贤基地(28°15'30"E, 116°20'24"N)开展。该地处于低山丘陵区,属中亚热带温湿型气候,年均温18.1°C,年均降水量1537 mm,无霜期289 d。试验地土壤为发育于第四纪红黏土的红壤,土壤初始理化性质:pH为4.92,有机质含量为13.1 g/kg,全氮、全磷和全钾含量分别为0.95、0.66和10.3 g/kg,碱解氮、有效磷

和速效钾含量分别为 51.0、13.4 和 57.0 mg/kg。

1.2 供试作物

供试作物为玉米(郑单 958)和鲜食大豆(浙鲜 16)。玉米和大豆施用含 N 460 g/kg 的尿素, 含 P₂O₅ 140 g/kg 的 Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 和含 K₂O 600 g/kg 的 KCl 作为基肥。玉米施纯 N 120 kg/hm², P₂O₅ 105 kg/hm², K₂O 135 kg/hm², 大豆施纯 N 60 kg/hm², P₂O₅ 63 kg/hm², K₂O 52.5 kg/hm²。

1.3 试验设计

采用裂区试验, 主区为不同间作模式, 包括玉米单作(M: 玉米行距 30 cm、株距 20 cm、密度 1.65 万/hm²)、鲜食大豆单作(S: 大豆行距 30 cm、株距 15 cm、密度 2.22 万/hm²)、2 行玉米 2 行鲜食大豆间作模式(2M2S: 玉米密度 0.96 万/hm²、大豆密度 1.47 万/hm²) 和 4 行玉米 2 行鲜食大豆间作模式(4M2S: 玉米密度 1.17 万/hm²、大豆密度 0.78 万/hm²)。2M2S 和 4M2S 间作模式中玉米带宽分别为 85 cm 和 115 cm, 行距分别为 60 cm 和 30 cm, 株距均为 20 cm), 鲜食大豆带宽为 55 cm、行距为 30 cm、株距为 15 cm, 玉米带与鲜食大豆带间距 50 cm。玉米播种时间为 4 月 27 日。每个主区设置 3 个裂区, 包括大豆在玉米播种前 15 d 播种(D1, 4 月 12 日), 大豆与玉米同期播种(D2, 4 月 27 日), 大豆在玉米播种后 15 d 播种(D3, 5 月 12 日)。每个主区设 3 个重复, 主区面积为 80 m², 裂区面积为 26 m²。

1.4 样品采集及测定

1.4.1 作物产量测定 在鲜食大豆采摘期和玉米成熟期每个小区单独计产称重。其中, 2M2S 和 4M2S 处理的鲜食大豆和玉米产量进一步根据种植密度换算成标准产量。另外, 本研究还测定了采摘期鲜食大豆的株高、荚果数, 并使用 FOSS DS2500 近红外谷物分析仪测定了鲜食大豆蛋白质含量。

1.4.3 土壤肥力指标测定 为重点研究鲜食大豆种植对土壤肥力指标的影响, 本研究在鲜食大豆采摘期, 采集大豆行间的土壤样品, 深度为 0~20 cm, 每个小区用不锈钢土钻采集 5 个点混合成 1 个样品, 带回室内风干、研磨、过筛后测定土壤有机质、速效氮磷钾含量^[19], 并以玉米单作土壤为对照。

1.5 数据处理与统计分析

参考 Mead 和 Willey^[20]的方法计算土地当量比(LER), 具体公式为:

$$LER = LER_m + LER_s = \frac{Y_{im}}{Y_{sm}} + \frac{Y_{is}}{Y_{ss}}$$

式中: LER_m 和 LER_s 分别为玉米和鲜食大豆的土地当

量比; Y_{im} 和 Y_{sm} 分别为间作和单作模式中玉米的产量; Y_{is} 和 Y_{ss} 分别为间作和单作模式中鲜食大豆的产量。

经济效益为作物产值与投入的差值。田间投入主要包括种子、化肥、农药等物资投入, 作物产值则按照作物产量乘以当地作物产品单价计算(2022 年鲜食大豆豆荚和玉米籽粒的价格分别为 5.6 元/kg 和 2.4 元/kg)。

所有数据均用 Excel 2010 进行整理, 采用 SAS 9.1 进行统计分析, 除玉米产量和土地当量比采用随机区组试验的 Duncan 方法进行 2M2S、4M2S 和 M 处理间的显著性分析之外, 鲜食大豆、经济效益及土壤肥力的相关指标均采用裂区试验的 LSD 方法进行主处理(2M2S、4M2S 和 S)之间和副处理(D1、D2 和 D3)之间的显著性分析。

2 结果与分析

2.1 鲜食大豆株高、荚果数变化

在所有处理中, 2M2S 模式的 D1 和 D2、4M2S 模式的 D1、S 模式的 D1 处理鲜食大豆株高均高于或显著高于其他处理, 2M2S 和 4M2S 模式中均呈现 D3 处理最低, 但 S 模式中则呈现 D2 处理最低(表 1)。进一步比较发现, 不同间作模式中 2M2S、4M2S 和 S 模式的鲜食大豆株高不存在显著差异, 但不同播期中 D1 处理的株高则显著高于 D2 和 D3 处理(增幅分别为 14.2% 和 33.2%), 且 D2 和 D3 处理之间也存在显著差异。

表 1 不同间作模式和播期下鲜食大豆的株高、荚果变化

Table 1 Changes of plant heights and pod numbers of edamame under different intercropping modes and sowing dates

影响因素	处理	株高(cm)	荚果数(万/hm ²)
间作模式×播期	2M2SD1	56.6 ± 9.0 a	627.2 ± 129.6 b
	2M2SD2	55.7 ± 3.0 a	382.2 ± 100.3 c
	2M2SD3	39.6 ± 6.6 b	373.4 ± 128.5 c
	4M2SD1	54.4 ± 6.4 a	413.9 ± 38.4 c
	4M2SD2	49.7 ± 6.4 ab	223.1 ± 73.8 d
	4M2SD3	39.3 ± 8.1 b	197.6 ± 67.9 d
	SD1	55.8 ± 8.3 a	1 234.3 ± 150.4 a
	SD2	40.7 ± 6.4 b	529.8 ± 112.4 bc
	SD3	46.3 ± 3.8 ab	515.0 ± 125.9 bc
	间作模式	2M2S	50.6 ± 10.1 a
		4M2S	47.8 ± 9.0 a
		S	47.6 ± 8.7 a
播期	D1	55.6 ± 7.0 a	758.5 ± 382.2 a
	D2	48.7 ± 8.06 b	378.4 ± 157.13 b
	D3	41.7 ± 6.53 c	362.0 ± 167.96 b

注: 表中不同小写字母表示同一影响因素下不同处理间差异在 P<0.05 水平上显著; 下同。

不同行比间作模式和播期显著影响鲜食大豆的荚果数(表1), 在所有处理中, S模式的D1处理鲜食大豆荚果数较其他处理显著提高了0.97倍~5.25倍, 其次为2M2S模式的D1处理, 较其他处理显著提高了0.18倍~2.17倍, 而4M2S模式的D2和D3处理则最低。进一步比较发现, 不同间作模式中2M2S和4M2S模式的荚果数均显著低于S模式, 较S模式分别低39.3%和63.4%, 而2M2S较4M2S模式显著提高65.7%。同时, 不同播期中D1处理的荚果数较D2和D3处理显著提高1.00倍和1.10倍, D2和D3处理间则无显著差异。

2.2 作物产量和土地当量比变化

不同行比间作模式和播期显著影响鲜食大豆的荚果鲜重(表2), 间作总面积产量中, S模式的D1处理鲜食大豆荚果鲜重显著高于其他处理, 比其他处理增加了1.38倍~29.82倍, 其次为S模式的D2和D3处理, 而4M2S模式的D2和D3处理则最低。单位面积产量中, 2M2S模式的D1处理鲜食大豆荚果鲜重显著高于其他处理, 比其他处理增加了0.31倍~

5.11倍, 其次为S模式的D1处理, 4M2S模式的D2和D3处理最低。进一步比较发现, 不同间作模式中2M2S、4M2S模式的间作总面积鲜食大豆荚果鲜重均显著低于S模式, 较S模式分别降低了77.4%、89.1%, 但单位面积产量鲜食大豆荚果鲜重2M2S较S模式显著提高了20.7%。同时, 不同播期中D1处理的间作总面积和单位面积鲜食大豆荚果鲜重显著高于D2和D3处理, 间作总面积产量分别提高了1.63倍和1.73倍, 单位面积产量分别提高了2.15倍和1.90倍, 而D2和D3处理间则无显著差异。

在所有处理中, 2M2S模式的D1处理土地当量比均高于其他处理, 比其他处理增加了5.4%~50.9%, 其次为4M2S模式的D1处理, 较其他处理提高了1.8%~43.1%, 但前两者差异未达到显著水平, 4M2S模式的D3处理最低。进一步比较发现, 不同间作模式中2M2S模式的土地当量比4M2S模式显著提高了18.6%, 3个播种期中土地当量比表现为D1处理最高, 较D2处理显著提高了14.0%, D2较D3处理显著提高了8.7%。

表2 不同间作模式和播期下作物产量和土地当量比变化
Table 2 Changes of crop yields and land equivalent ratios under different intercropping modes and sowing dates

影响因素	处理	间作总面积产量($10^3 \text{ kg}/\text{hm}^2$)		单位面积产量($10^3 \text{ kg}/\text{hm}^2$)		土地当量比
		玉米	鲜食大豆	玉米	鲜食大豆	
间作模式×播期	2M2SD1	4.36 ± 0.11	2.12 ± 0.03 c	9.97 ± 0.09	11.3 ± 0.20 a	1.75 ± 0.01 a
	2M2SD2	4.36 ± 0.11	0.61 ± 0.01 e	9.97 ± 0.09	3.23 ± 0.05 e	1.63 ± 0.02 a
	2M2SD3	4.36 ± 0.11	0.79 ± 0.01 e	9.97 ± 0.09	4.21 ± 0.03 d	1.59 ± 0.01 a
	4M2SD1	5.98 ± 0.1	1.12 ± 0.22 d	10.9 ± 0.07	7.49 ± 0.42 c	1.66 ± 0.01 a
	4M2SD2	5.98 ± 0.1	0.28 ± 0.01 f	10.9 ± 0.07	1.85 ± 0.01 f	1.37 ± 0.01 b
	4M2SD3	5.98 ± 0.1	0.30 ± 0.01 f	10.9 ± 0.07	1.98 ± 0.01 f	1.16 ± 0.01 c
	SD1	—	8.63 ± 0.09 a	—	8.62 ± 0.14 b	—
	SD2	—	3.63 ± 0.04 b	—	3.63 ± 0.05 e	—
	SD3	—	3.26 ± 0.01 b	—	3.26 ± 0.02 e	—
	M	13.4 ± 0.23	—	13.4 ± 0.23	—	—
间作模式	2M2S	4.36 ± 0.11 c	1.17 ± 0.05 b	9.97 ± 0.09 b	6.24 ± 0.11 a	1.66 ± 0.01 a
	4M2S	5.98 ± 0.1 b	0.57 ± 0.04 c	10.9 ± 0.07 b	3.77 ± 0.08 c	1.40 ± 0.02 b
	S	—	5.17 ± 0.08 a	—	5.17 ± 0.02 b	—
	M	13.4 ± 0.23 a	—	13.4 ± 0.23 a	—	—
播期	D1	5.17 ± 0.09	3.95 ± 0.06 a	10.4 ± 0.14	9.13 ± 0.12 a	1.71 ± 0.01 a
	D2	5.17 ± 0.09	1.50 ± 0.11 b	10.4 ± 0.14	2.90 ± 0.09 b	1.50 ± 0.01 b
	D3	5.17 ± 0.09	1.45 ± 0.03 b	10.4 ± 0.14	3.15 ± 0.08 b	1.38 ± 0.01 c

2.3 鲜食大豆蛋白质变化

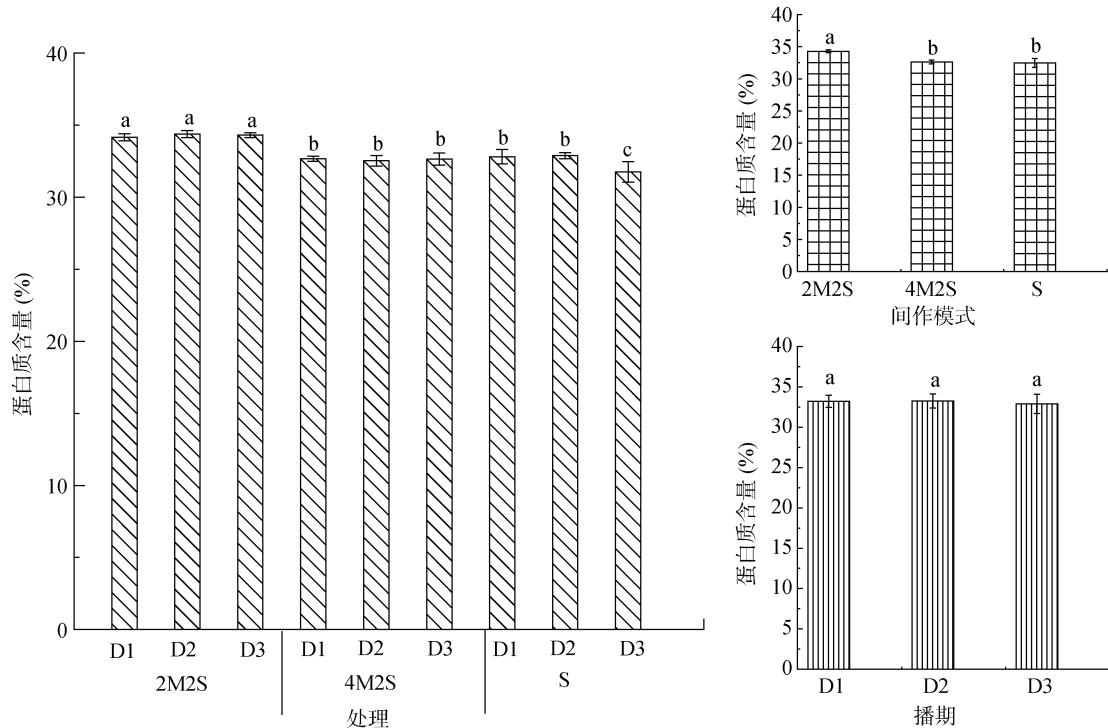
在所有处理中, 2M2S模式的D1、D2和D3处理鲜食大豆蛋白质含量均显著高于其他处理, 而S模式的D3处理最低(图1)。进一步比较发现, 不同

间作模式中2M2S模式的鲜食大豆蛋白质含量显著高于4M2S和S模式, 分别比4M2S和S模式提高了5.1%和5.5%, 而3个播种期D1、D2和D3处理的鲜食大豆蛋白质含量则无显著差异。

2.4 经济效益分析

在所有处理中, 2M2S 模式的 D1 处理经济效益最高, 较其他处理提高 0.24 倍 ~ 3.89 倍, 其次是 4M2S 模式的 D1 处理, 较其他处理提高了 0.38 倍 ~ 2.94 倍, S 模式的 D2 处理最低(表 3)。进一步比较发

现, 不同间作模式中 2M2S 模式下经济效益最高, 较其他模式提高了 0.20 倍 ~ 1.33 倍, 其次是 4M2S 模式, 较其他模式提高了 35.2% ~ 94.7%, S 模式最低。同时, 不同播期中 D1 处理的经济效益最高, 较 D3 和 D2 处理分别显著提高了 80.4% 和 90.2%。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著)

图 1 不同间作模式和播期下鲜食大豆的蛋白质变化

Fig.1 Changes of edamame protein contents under different intercropping modes and sowing dates

表 3 不同间作模式和播期下经济效益变化

Table 3 Changes of economic benefits under different intercropping modes and sowing dates

影响因素	处理	投入(万元/ hm^2)	产值(万元/ hm^2)	经济效益(万元/ hm^2)
间作模式×播期	2M2SD1	0.664	6.90 ± 0.85 a	6.84 ± 0.85 a
	2M2SD2	0.664	3.69 ± 0.41 d	3.62 ± 0.17 cd
	2M2SD3	0.664	4.08 ± 0.20 c	4.01 ± 0.20 c
	4M2SD1	0.899	5.61 ± 0.34 b	5.52 ± 0.34 b
	4M2SD2	0.899	3.35 ± 0.24 d	3.26 ± 0.24 d
	4M2SD3	0.899	3.40 ± 0.07 d	3.31 ± 0.07 d
	SD1	0.490	3.45 ± 0.32 d	3.40 ± 0.32 d
	SD2	0.490	1.45 ± 0.46 e	1.40 ± 0.46 e
	SD3	0.490	1.46 ± 0.15 e	1.41 ± 0.16 e
	M	1.21	3.21 ± 0.32 d	2.98 ± 0.18 d
间作模式	2M2S	0.664	4.89 ± 0.49 a	4.82 ± 0.09 a
	4M2S	0.899	4.12 ± 0.22 b	4.03 ± 0.08 b
	S	0.490	2.11 ± 0.31 d	2.07 ± 0.32 c
	M	1.210	3.22 ± 0.32 c	2.98 ± 0.18 c
播种期	D1	0.664	5.32 ± 0.22 a	5.25 ± 0.30 a
	D2	0.899	2.90 ± 0.31 b	2.76 ± 0.11 b
	D3	0.490	2.98 ± 0.13 b	2.91 ± 0.06 b

2.5 土壤肥力特征变化

不同行比间作模式和播期主要显著影响土壤碱解氮和速效钾含量(表 4), 而土壤有机质和有效磷含量则无显著变化。对于土壤碱解氮, 各处理中以 2M2S 模式的 D1 和 D3 处理、4M2S 模式的 D2 处理、S 模

式的 D1 和 D3 处理较高, 显著高于其余处理。在不同间作模式之间, 4M2S 和 2M2S 模式的土壤碱解氮含量显著低于 S 模式, 分别较 S 模式降低了 18.2% 和 27.1%; 而不同播期之间则以 D1 处理的土壤碱解氮含量显著高于 D2 处理(增幅为 28.1%)。

表 4 不同间作模式和播期下土壤肥力特征变化

Table 4 Changes of soil fertility characteristics under different intercropping modes and sowing dates

影响因素	处理	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
间作模式×播期	2M2SD1	12.75 ± 2.40 a	62.48 ± 12.73 a	12.90 ± 5.23 a	67.50 ± 19.84 ab
	2M2SD2	14.98 ± 2.72 a	31.85 ± 7.65 b	13.75 ± 0.78 a	49.17 ± 3.82 bc
	2M2SD3	12.60 ± 1.16 a	62.48 ± 7.35 a	15.35 ± 3.67 a	72.50 ± 15.61 a
	4M2SD1	14.84 ± 1.50 a	37.98 ± 11.81 b	13.77 ± 1.70 a	52.50 ± 4.33 bc
	4M2SD2	13.15 ± 1.17 a	67.38 ± 14.85 a	13.02 ± 3.83 a	63.33 ± 17.74 abc
	4M2SD3	14.05 ± 3.54 a	34.30 ± 9.25 b	15.41 ± 1.93 a	47.50 ± 2.50 c
	SD1	12.73 ± 1.64 a	72.28 ± 12.91 a	15.03 ± 1.08 a	53.33 ± 5.20 bc
	SD2	12.97 ± 1.06 a	46.55 ± 7.65 b	12.09 ± 3.81 a	65.83 ± 3.82 abc
	SD3	13.37 ± 0.33 a	72.76 ± 10.61 a	13.15 ± 0.74 a	56.67 ± 3.82 abc
	M	14.97 ± 1.01 a	37.98 ± 11.23 b	11.62 ± 4.08 a	51.67 ± 1.44 bc
	2M2S	13.44 ± 2.23 a	52.27 ± 17.41 b	14.00 ± 3.39 a	63.06 ± 16.62 a
	4M2S	14.01 ± 2.14 a	46.55 ± 18.92 c	14.07 ± 2.54 a	54.44 ± 11.58 a
	S	13.02 ± 1.03 a	63.86 ± 15.91 a	13.42 ± 2.39 a	58.61 ± 6.74 a
	M	14.97 ± 1.01 a	37.98 ± 11.23 d	11.62 ± 4.08 a	51.67 ± 1.44 a
播种期	D1	13.82 ± 1.64 a	57.67 ± 12.17 a	13.92 ± 2.23 a	55.93 ± 8.50 a
	D2	13.74 ± 1.53 a	45.01 ± 9.23 b	12.98 ± 2.90 a	62.17 ± 9.57 a
	D3	13.05 ± 1.74 a	51.71 ± 8.78 ab	14.46 ± 2.22 a	60.24 ± 6.85 a

土壤速效钾含量主要表现为 2M2S 模式的 D3 处理最高, 其次是 2M2S 模式的 D1 处理、S 模式的 D2 处理、4M2S 模式的 D2 处理, 而 4M2S 模式的 D3 处理则最低。然而, 深入分析则表明, 不同间作模式和播期之间均无显著差异。

3 讨论

3.1 玉米鲜食大豆间作方式对作物产量及经济效益的影响

合理的荚果数是大豆高产的基础条件之一^[21]。本研究中, 在 4 月 12 日至 5 月 12 日之间, 红壤丘陵区鲜食大豆播期越早荚果鲜重越高, 分析其原因可能是早播大豆生育期较长, 其株高较高, 单株有效荚果数高, 故而产量较高, 这也与前人的研究^[21-22]相符合。然而, 由于红壤丘陵区较早播种可能会遭遇低温冻害, 因此, 关于鲜食大豆合理的播种时期仍有待进一步验证。

土地当量比是衡量间作(相比单作)增产程度的一项重要指标, 不同生态类型地区, 不同作物、不同

带宽的间作增产效果不同。高砚亮等^[23]对玉米(M)与花生(P)间作种植方式的研究发现, 2M4P、4M4P 的土地当量比在 1.10~1.24, 显著提高了 10%~24%。本试验中, 红壤丘陵区玉米(M)和鲜食大豆(S)在 2M2S 和 4M2S 两种模式下土地当量分别提高了 66% 和 40%, 且 2M2S 模式的鲜食大豆在株高与荚果数方面也显著优于单作, 说明合理间作可以通过增加土地生产率而提高作物产量。其中, 2M2S 模式土地当量比较高, 这一结果也与西南地区相关研究结果^[10-11]一致, 说明该间作模式可以进一步在红壤丘陵区进行推广应用。通过增加作物产量是提高土地单位面积经济效益的一种重要方式。本研究中, 玉米和鲜食大豆在 2M2S 与 4M2S 种植模式下经济效益均显著增加, 2M2S 模式的经济效益分别比玉米单作、大豆单作提升了 0.62 倍和 1.33 倍, 4M2S 模式的经济效益则分别比玉米单作、大豆单作提升了 35.2% 和 94.7%, 说明玉米鲜食大豆间作种植可以促进经济效益的提升, 且 2M2S 间作模式提升效果较好, 原因可能是 4M2S 模式方式下, 鲜食大豆受到邻株玉米的隐

蔽程度较重, 加上随着作物群体密度的增加, 植株间相互制约, 光温水肥等的竞争强度增大, 导致大豆产量较低^[24]。此外, 2M2S 模式下鲜食大豆的蛋白质含量最高, 这可能是因为合理的种植模式有利于促进大豆光合作用, 从而增加大豆蛋白质含量^[25]。因此, 综合经济效益及鲜食大豆品质等多个角度来考量, 2M2S 模式更具有优势。但由于本研究对农艺性状、产量构成等指标的研究不够完善, 因此, 各模式的增产增收机理仍有待进一步分析。

3.2 玉米鲜食大豆间作方式对土壤肥力变化的影响

土壤养分是作物生长和产量形成的基础, 是衡量土壤肥力高低的重要指标^[26]。不同间作方式对土壤氮磷钾养分含量影响不同。本研究结果显示, 红壤丘陵区玉米和鲜食大豆在 2M2S 和 4M2S 模式下土壤碱解氮和速效钾含量较玉米单作有明显的提升, 其中, 2M2S 模式下土壤碱解氮和速效钾含量较玉米单作分别提升了 37.6% 和 22.0%, 4M2S 模式下土壤碱解氮和速效钾含量较玉米单作分别提升了 22.6% 和 5.4%。其原因一方面与各处理的氮磷钾养分投入存在差异有关, 而各处理不同的作物产量也会导致对氮磷钾养分吸收量存在较大差异, 且长期不同施肥试验表明氮素盈余量的增加与耕层土壤碱解氮含量呈显著正相关^[27], 因此, 建议后续结合各处理氮磷钾养分的表观盈余量, 进一步探讨 2M2S 和 4M2S 模式下土壤碱解氮和速效钾含量增加的相关机制; 另一方面, 2M2S 和 4M2S 模式下大豆根瘤的固氮作用促进了土壤碱解氮含量的增加, 再加上大豆根际土壤中相关的微生物和酶活性等指标的增加也可能进一步加快土壤氮钾养分的活化过程^[28], 从而导致土壤碱解氮和速效钾含量增加, 但具体原因还有待进一步研究。而本研究中, 各间作模式下土壤有机质和有效磷含量与单作相比无明显变化, 可能与前期养分投入不足, 而玉米在生长发育过程中对养分的消耗较大有关。这也与前人研究有所不同, 刘宇峰等^[29]研究发现, 果蔗花生间作模式下土壤有机质、碱解氮、速效钾含量均有较大幅度的增加, 而速效钾含量则表现为下降, 这可能与不同作物对养分的吸收存在差异有关。

4 结论

在红壤丘陵区, 与玉米、鲜食大豆单作相比, 2 行玉米和 2 行鲜食大豆间作模式下作物产量和土地当量比均存在显著优势; 在 4 月 12 日至 5 月 12 日之间, 鲜食大豆播期越早, 作物产量和经济效益越高。同时, 2 行玉米和 2 行鲜食大豆间作模式还有

利于土壤碱解氮和速效钾含量提升, 具有较好的施肥作用。

参考文献:

- [1] 张洪程, 胡雅杰, 杨建昌, 等. 中国特色水稻栽培学发展与展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1301–1321.
- [2] 侯云鹏, 孔丽丽, 蔡红光, 等. 东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3559–3572.
- [3] 陈国清, 刘小兵, 陆大雷, 等. 甜玉米钾素积累和分配的基因型差异[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1039–1044.
- [4] 祝玲月, 王晓玥, 陈晏, 等. 微生物关键种影响植物残体还田条件下木质素酚浓度——基于 30 年长期有机施肥试验[J]. 土壤, 2024, 56(1): 56–63.
- [5] 杨文钰, 杨峰. 发展玉豆带状复合种植, 保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748–3750.
- [6] 雍太文, 刘小明, 宋春, 等. 种植方式对玉米? 大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659–667.
- [7] 曹云, 马艳. 间套作防治作物土传枯萎病的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 466–473.
- [8] 杜青, 陈平, 刘姗姗, 等. 玉米-大豆间套作下田间小气候对大豆花形态建成进程的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(13): 2746–2758.
- [9] 全国农业技术推广服务中心, 国家大豆玉米带状复合种植专家指导组. 2022 年西南地区大豆玉米带状复合种植技术意见 [OL]. 2022-3-24. http://www.moa.gov.cn/ztzl/dyymdzfhjs/jszd_29063/202203/t20220324_6393738.htm.
- [10] Feng L Y, Ali Raza M, Shi J Y, et al. Delayed maize leaf senescence increases the land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 118: 126092.
- [11] Ali Raza M, Feng L Y, van der Werf W, et al. Optimum leaf defoliation: A new agronomic approach for increasing nutrient uptake and land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system[J]. Field Crops Research, 2019, 244: 107647.
- [12] 雍太文, 陈平, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1485–1495.
- [13] 任胜茂, 邓榆川, 文凤君, 等. 套作对大豆苗期碳氮物质代谢的影响及其与抗倒伏性的关系[J]. 草业学报, 2018, 27(9): 85–94.
- [14] 陈元凯, 冯铃洋, Ali Raza M, 等. 四川地区玉米/大豆带状套作对大豆形态、叶绿素荧光特征及系统产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 870–879.
- [15] 王贝贝, 廖敦平, 范元芳, 等. 玉米大豆套作窄行距对作物竞争效应及物质分配的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(5): 734–742.
- [16] Zhang Y, Sun Z X, Su Z C, et al. Root plasticity and interspecific complementarity improve yields and water use efficiency of maize/soybean intercropping in a water-limited condition[J]. Field Crops Research, 2022, 282: 108523.

- [17] Ren Y Y, Wang X L, Zhang S Q, et al. Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415(1): 131–144.
- [18] 张佳运, 马淑梅, 余常兵, 等. 长江流域旱地多熟模式水分供需平衡特征与水分生产效益[J]. *作物学报*, 2022, 48(11): 2891–2907.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [20] Mead R, Willey R W. The concept of a ‘land equivalent ratio’ and advantages in yields from intercropping[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(3): 217–228.
- [21] 梁建秋, 于晓波, 何泽民, 等. 不同熟期类型大豆品种在玉豆间作模式下农艺性状和产量的比较研究[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(6): 1077–1086.
- [22] 吴雨珊, 龚万灼, 谭千军, 等. 套作大豆农艺性状与产量的关系研究[J]. *大豆科学*, 2015, 34(3): 394–401.
- [23] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19): 3702–3713.
- [24] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 227–237.
- [25] 蔡凌, 刘卫国, 李奇, 等. 玉米-大豆带状套作对大豆蛋白特性的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(3): 328–335.
- [26] 王安琪, 杨平, 赵燕洲, 等. 不同种植模式下农田耕层土壤肥力现状比较——以皖南宣州区为例[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 277–284.
- [27] 宋惠洁, 胡丹丹, 邬磊, 等. 长期有机无机肥配施下玉米氮素利用率和红壤碱解氮含量的阶段性变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(11): 2030–2040.
- [28] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 731–739.
- [29] 刘宇锋, 潘增宝, 苏天明, 等. 果蔗-花生不同间种处理对产量、经济效益和土壤理化性状的影响[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(12): 2333–2340.